Aus dem LVI. Bde. d. Sitzb. d. k. Akad. d. Wissensch. II. Abth. Juni-Heft. Jahrg. 1867.

Untersuchungen über Brown's Molecularbewegung.

Von **Sigmund Exner.**

(Aus dem physiologischen Institute der Wiener Universität.)

(Vorgelegt in der Sitzung am 21. Juni 1867.)

Die von Brown im Jahre 1827 entdeckte und nach ihm benannte Molecularbewegung besteht in einer unter dem Mikroskope sichtbaren zitternden Bewegung fein vertheilter Körper, die frei in einer Flüssigkeit suspendirt sind. Da diese Partikeln — so will ich der Kürze wegen jene Körpertheilchen nennen — nicht nach Art eines in Pendelbewegung schwingenden Körpers an denselben Ort zurückkehren, von dem sie ausgegangen, sondern anscheinend fortwährend neue Impulse bekommen, so entsteht eine unregelmäßig fortschreitende Bewegung, die die Summe, bezüglich Differenz der einzelnen kleinen Verschiebungen darstellt. Den durch dieses Wandern von den Partikeln zurückgelegten Weg benützte ich als Maß für die Lebhaftigkeit der Bewegung.

Man erhält auf diese Weise zwar nicht absolut richtige, aber doch relativ annähernd genaue Resultate.

Ich schaltete zu diesem Zwecke nach dem Beispiele Wiener's [1]) einen in Quadrate eingetheilten Maßstab aus Glas so in das Ocular meines Mikroskopes ein, daß mein ganzes Sehfeld in verhältnißmäßig kleine Quadrate getheilt schien, dadurch ward es mir möglich, den von einem Partikel zurückgelegten Weg direct zu messen. Waren die Partikeln unter gleichen Verhältnissen beobachtet und möglichst gleich groß gewählt, so waren die Resultate gewöhnlich ziemlich übereinstimmende.

Um mein Object vor jeder Verdunstung, vor Strömen der ganzen Flüssigkeit und vor sonstigen störenden Einflüssen zu schützen,

---

[1]) Poggendorf's Annal. CXVIII.

bedeckte ich immer den auf einen Objectträger gebrachten Tropfen mit einem Deckgläschen, und schloß nun den so durch die Flüssigkeit vollkommen erfüllten Raum zwischen Deckgläschen und Objectträger durch eine an den Rändern des Deckgläschens aufgetragene Schichte Asphaltlack vollkommen ab.

So ward das Object auf den Tisch des Mikroskopes gebracht, einige Minuten ruhen gelassen, um ein etwa doch eintretendes Strömen der Flüssigkeit (durch Druck auf das Deckgläschen u. a.) zur Ruhe kommen zu lassen, und dann wenn Vergleiche zwischen zwei Beobachtungen gemacht werden sollten, schnell hinter einander an demselben Object beobachtet.

Ich verwendete zu diesen Untersuchungen gefällten Schwefel, gefällten Mastix, Zinnober, gepulverte Kohle und Glimmer u. ä., hauptsächlich aber in Wasser suspendirtes Gummigutt.

Es entsteht zunächst die Frage, ob die Partikeln oder die Flüssigkeit das Bewegende sind. — Ich muß mich der Ansicht derer anschließen, die in der Bewegung der Partikeln nur den Ausdruck einer Bewegung der Flüssigkeit sehen, indem sie in derselben kleine Strömchen annehmen, von welchen die Partikeln mitgerissen werden. Es scheinen mir für diese Auffassung auch folgende Erscheinungen zu sprechen.

Man sieht oft zwei Partikeln sich eine Zeit lang eng neben einander fortbewegen, ohne sich zu berühren. Da dies nicht Folge der Cohäsion sein kann, da die Partikeln noch eine sichtbare Strecke von einander entfernt sind, so liegt es nahe anzunehmen, sie seien beide in eines jener angenommenen Strömchen gerathen, von diesem in ein zweites u. s. w., bis sie wieder von zwei verschiedenen Strömen fortgerissen werden.

Ferner wird die Bewegung der einzelnen Partikeln um so geringer, je mehr derselben in einer gewissen Flüssigkeitsmenge zusammengedrängt sind. Da die Partikeln sich nicht durch gegenseitiges Aneinanderstoßen hindern, wie man leicht sehen kann, sondern ihre Bewegungen selbst in ganz geringes Zittern übergegangen sind, so kann man nur annehmen, daß jene supponirten Flüssigkeitsströmchen einen großen Theil ihrer lebendigen Kraft an die relativ trägen Partikeln abgeben, ähnlich wie die Kraft des Windes durch die von ihm in Bewegung gesetzten Flügel einer Windmühle gebrochen wird.

Die Bewegung in einer solchen, durch die Menge der Partikeln dick gewordenen Flüssigkeit bekömmt den Charakter jener Molecularbewegung, die sich auch in anderen zähflüssigen Körpern, z. B. in verdünntem Glycerin, Öl u. s. w. zeigt. Es nimmt nämlich die Lebhaftigkeit der Molecularbewegung mit der Zähigkeit der Flüssigkeit im umgekehrten Verhältnisse ab, und hört schon im gewöhnlichen käuflichen Glycerin von dem specifischen Gewichte = 1·21 vollständig oder nahezu vollständig auf. Nur durch ein später zu erwähnendes Mittel war ich im Stande, sie auch in dieser Flüssigkeit deutlich wahrnehmbar zu machen.

Was nun die Einflüsse anbelangt, die ich auf Molecularbewegung auszuüben vermochte, so sind es weder chemische noch mechanische als Druck, Erschütterung u. s. w., die irgend eine Beschleunigung oder Verlangsamung erzeugen. Nur durch Licht und Wärme läßt sie sich beschleunigen. Die Beobachtungen hierüber sind folgende:

Eine Zählung vorgenommen bei einer Zimmertemperatur von 20° C. und die Wanderung jedes Partikels zwei Minuten lang beobachtet, ergab folgende Zahlen: 6, 6, 5, 7, 3, 10. Nun ließ ich die strahlende Wärme eines Bunsen'schen Brenners auf den Spiegel des Mikroskopes fallen, so daß ein in die Öffnung des Objecttisches gesenktes Thermometer die Temperatur von 29° C. zeigte und nahm abermals eine Zählung vor. Die Resultate waren: 13, 16, 10, 12, 22, 12. Das Mittel der Beobachtung ohne strahlende Wärme ist somit 6·17; das Mittel der Beobachtung mit strahlender Wärme 14·17. Eine zweite Beobachtung, bei welcher ich die Wärme einer nahe an das Mikroskop herangerückten Petroleumflamme anwendete, ergab, wenn ein zwischen Flamme und Mikroskopspiegel gestelltes flaches Gefäß mit Alaunlösung, zur Abhaltung des größten Theiles der Wärmestrahlen, gefüllt war: 3, 4, 4, 6, 3, 4; wenn das Gefäß nun statt mit Alaunlösung mit Wasser gefüllt wurde: 7, 8, 7, 6, 8, 7: also das Mittel der Bewegung nach Abhaltung der Wärmestrahlen 4, unter Mitwirkung derselben 7·17. Ähnlich verhielt es sich, wenn ich directes Sonnenlicht auf den Spiegel fallen ließ: ich erhielt als Mittel der Bewegung nach Einschaltung der Alaunlösung 8·25, und ohne diese 11·5. Dieselbe Beschleunigung der Molecularbewegung, die ich durch strahlende Wärme hervorzurufen vermochte, fand auch bei leitender Wärme statt.

Ich beobachtete mein Object auf dem heizbaren Objecttisch bei einer Temperatur von 43° C. (am Thermometer des heizbaren Objecttisches abgelesen) und fand 17, 16, 18, 19, 12, 12 und darauf ohne diesen bei einer Temperatur von 21° C. und bekam die Resultate 9, 6, 9, 5, 9, 8. Das gibt als Mittel der ersten Zählung 15·67 und als Mittel der zweiten Zählung 7·67.

In Glycerin zeigt sich, wie oben erwähnt, keine oder nahezu keine Molecularbewegung: am heizbaren Objecttisch bis zu 50° C. erwärmt, zeigt sie sich ganz deutlich.

Um einen Vergleich zwischen den Wirkungen der strahlenden und leitenden Wärme herzustellen, legte ich ein Object, das bei gewöhnlicher Zimmertemperatur 9·75 als Durchschnittszahl ergab auf den heizbaren Objecttisch und erwärmte so lange, bis eine gewisse Mischung von Öl und Stearin eben schmolz; es war dies bei einer Temperatur von 40° C., dann nahm ich die Zählung vor.

Nun ließ ich nach Erkaltung des Objectes eine solche Quantität strahlender Wärme auf dasselbe fallen, daß die Mischung abermals schmolz, und zählte wieder. Ich bekam im ersten Falle als Durchschnittszahl 13·25, im zweiten 13·5, also ziemlich übereinstimmende Resultate.

Da der geringe Unterschied ganz wohl Beobachtungsfehler sein kann, sind die Wirkungen gleich anzuschlagen. Allerdings weiß man nicht, ob die Wirkung im zweiten Falle nicht theilweise von der durch strahlende Wärme entstandenen leitenden herrührt.

Wie die Erhöhung der Intensität der Wärme, brachte auch die Erhöhung der Lichtintensität [1]) eine Beschleunigung der Molecularbewegung hervor [2]). Eine Zählung bei grellem Lampenlicht ergab 6, 8, 8, 8, 5, 7, darauf bei Dämpfung desselben 4, 5, 5, 5, 6, 7. Also die Durchschnittszahlen 7 und 5·33.

Natürlich war in beiden Fällen die strahlende Wärme durch Alaunlösung absorbirt.

---

[1]) Diese Ausdrücke sind nicht etwa so zu deuten, als ob ich der Lehre von der Nichtidentität von Licht und Wärme anhinge. Wie sie zu verstehen sind, ergibt sich leicht aus der Art der angestellten Versuche.

[2]) Schon J. Renauld (Etudes relatives au phénomène désigné sous le nom du mouvement Brownien. J. d. pharm. 3. XXXIV.) brachte durch Dämpfung des Sonnenlichtes eine Verlangsamung der Molecularbewegung hervor.

Eben so zeigte ein und dasselbe Körperchen bei grellem Lichte beobachtet die Geschwindigkeit 14 und bei gedämpftem 10.

Doch nicht nur die Quantität des auffallenden Lichtes, auch die Qualität scheint einen Einfluß auf Molecularbewegung zu haben.

Ich ließ das rothe Licht des Farbenspectrums auf den Spiegel meines Mikroskopes fallen und eine Zählung ergab als Durchschnittszahl 8·75 hierauf die Zählung bei blauem Lichte vorgenommen, ergab 9·25. Etwas sicheres hierüber auszusprechen, ist jedoch der jedenfalls geringen Differenzen und der Schwierigkeit wegen in beiden Fällen gleiche Intensität herzustellen kaum möglich.

Man kann sowohl bei künstlich erhöhter, als auch bei normaler Molecularbewegung beobachten, daß nicht alle Partikeln eines Objectes sich mit gleicher Lebhaftigkeit bewegen, sondern diese mit der Zunahme des Volumens rasch abnimmt, so daß die Bewegung eines Gummigutttheilchens von $\frac{1}{250}$ Millim. Durchmesser kaum mehr zu sehen ist. Die Ursache hievon liegt darin, daß die Oberflächen, mithin die auf dieselben übertragenen Kräfte der Flüssigkeitsströmchen im quadratischen, die Volumina aber, mithin die durch jene Kräfte zu bewegenden Maßen im kubischen Verhältnisse zu den Radien (wenn wir uns die Partikeln als Kugeln vorstellen) stehen. Wenn wir uns eine Partikel wachsen denken, so wächst die auf dasselbe einwirkende Kraft, wie die Quadrate ihrer Radien, während die durch diese Kraft zu bewältigende Masse wie die dritten Potenzen der Radien wächst.

Vorstehende Beobachtungen über Molecularbewegung brachten mich auf das Studium der Eigenschaften von Flüssigkeiten, in welchen Partikeln suspendirt sind, und somit Molecularbewegung stattfindet.

Ich benützte hiebei hauptsächlich die Lösung von Gummigutt in Wasser. Dasselbe enthält jedoch, wie es in Handel kommt, beträchtliche Mengen Gummis, von welchen es durch Auswaschen auf dem Filter wegen der Kleinheit der Harztheilchen selbst nicht befreit werden kann. Ich löste es deßhalb in Weingeist, filtrirte durch schwedisches Filtrirpapier das gefällte Arabin ab, brachte durch Zusatz von Wasser das gelöste Harz in jene fein vertheilte Form, in welcher es Molecularbewegung zeigt, und dampfte nun am Wasserbade unter häufigem Umrühren und Wasserzusatz von der

Emulsion den Weingeist ab. Da man mit diesem Abdampfen und Zusetzen des Wassers beliebig lang fortfahren kann, ist es möglich, den Weingeist vollkommen zu vertreiben.

Es muß auffallen, daß in einer solchen Flüssigkeit, (die ich, da ich noch öfter von ihr zu sprechen habe, der Kürze wegen Gummi-Gutt-Wasser nennen will) die Partikeln, obwohl sie ein bedeutendes specifisches Gewicht haben, bis ins Unbegrenzte suspendirt bleiben, man mag sie noch so sehr vor allen äußeren Einflüssen schützen.

Auch die Erscheinung, daß Zinnober, dessen specifisches Gewicht bekanntlich achtmal schwerer ist, als das des Wassers, wenn er durch Auskochen von aller adhärirenden Luft befreit, und durch Schütteln in Wasser vollkommen vertheilt ist, stundenlang suspendirt bleibt, kann man nicht leicht blos von dem den sinkenden Partikeln entgegengesetzten Widerstand, und die durch das Sinken entstandenen aufsteigenden Flüssigkeitsströmchen herleiten.

Wenn man ein Probirgläschen theilweise mit Gummi-Gutt-Wasser füllt, und dann auf diese vorsichtig aus einer Pipette klares Wasser nachfließen läßt, das Probirgläschen, ohne es zu schütteln an einen möglichst gleich temperirten Ort in ein größeres mit Wasser gefülltes Gefäß einsenkt, um jede durch Temperaturveränderung erzeugte Strömung zu verhindern; so gewahrt man von der vollkommen ebenen Grenzfläche zwischen den beiden Flüssigkeiten sich eine leise Trübung erheben, und allmälig nach oben fortschreiten, bis die ganze Flüssigkeit dieselbe Färbung angenommen hat.

Ähnlich, nur viel langsamer geht die Mischung vor sich, wenn man in eine Glasröhre zuerst Wasser, und dann Gummi-Gut-Wasser einsaugt, und sie so sich selbst überläßt. Kehrt man jedoch eine solche Glasröhre um, daß das Gummi-Gutt-Wasser oben, und das reine Wasser unten zu stehen kommt, so mischt sich die Flüssigkeit binnen zehn bis fünfzehn Minuten, während dieser Vorgang sonst mehrere Tage in Anspruch nimmt.

Wenn man Gummi-Gutt-Wasser durch eine Scheidewand aus Filtrirpapier von Wasser trennt, so treten nichts desto weniger Partikeln durch dieselbe heraus, und Wasser statt ihrer hinein.

Die Ursache dieser Erscheinungen ist klar, wenn man eben die Flüssigkeit nicht als eine ruhende Masse betrachtet, sondern in Übereinstimmung mit den oben angeführten Resultaten in derselben eine

ihre kleinsten Theilchen fortwährend gegeneinander verschiebende Bewegung annimmt, in deren Folge die Partikeln nicht nur in horizontaler Richtung bewegt werden, wie man es unter dem Mikroskope sieht, sondern auch gegen die Richtung der Schwerkraft nach aufwärts gehoben werden können.

Daß jene Flüssigkeitsströmchen wirklich die Ursache dieser Erscheinungen sind, zeigt sich dadurch, daß die Geschwindigkeit, mit welcher die Mischung von Gummi-Gutt-Wasser mit klarem Wasser vor sich geht von denselben Umständen abhängt, von welchen die Lebhaftigkeit der Molecularbewegung, somit die Lebhaftigkeit jener Strömchen bedingt ist.

In dunklen und kühlen Räumen nämlich geht eine Mischung kaum mehr, oder nur noch sehr langsam vor sich, und eine blos mit Gummi-Gutt-Wasser gefüllte, mit schwarzem Papier umkleidete und in den Eiskeller gestellte Eprouvette zeigt schon nach drei Tagen an ihrem Inhalt ein Zubodensetzen der Partikeln.

Wie die Molecularbewegung in dicken Flüssigkeiten bedeutend geringer ist, als in dünnen, so tritt die Mischung mit Wasser bedeutend früher ein, wenn erstere dünn, als wenn sie dick ist. Man kann ferner, besonders bei reichlicher mit Partikeln erfüllten Flüssigkeiten leicht wahrnehmen, daß immer die kleinsten Partikeln, somit diejenigen, welche die lebhafteste Molecularbewegung haben, es sind, welche zuerst aufsteigen; sie sind so klein, daß die Flüssigkeit nicht getrübt, sondern nur opalisirend erscheint.

Schließlich will ich noch bemerken, daß man jene Eigenschaft der Flüssigkeiten, daß sie specifisch schwerere in ihnen suspendirte Partikeln bei vollkommenem Abschluß von Licht und Wärme zu Boden sinken lassen, ganz wohl als Mittel zur Isolirung von Niederschlägen benützen kann, die durch das Filter gehen, und sich unter gewöhnlichen Umständen nicht absetzen.

Ich fasse noch kurz die Schlüsse zusammen, zu welchen mich die Versuche geführt haben.

1. Als Ursache der Molecularbewegung kann man kleine Strömchen in den Flüssigkeiten ansehen, welche die Partikeln mitreißen.

2. Die Lebhaftigkeit der Molecularbewegung wird erhöht durch Licht und Wärme, und zwar sowohl durch strahlende als durch zugeleitete.

3. Eine Folge der Molecularbewegung ist es, daß die Partikeln in einer specifisch leichteren Flüssigkeit nicht nur nicht zu Boden sinken, sondern die Schwerkraft überwältigen, um sich gleichmäßig in der Flüssigkeit zu vertheilen.

4. Die Geschwindigkeit dieser Vertheilung wird wie die Intensität der Molecularbewegung durch Licht und Wärme erhöht.

Aus der k. k. Hof- und Staatsdruckerei in Wien.